



SELenological and Engineering Explorer

# 探査機「かぐや」が見た月



ロッチ2007-9-14T10:31:01JST  
@JAXA種子島宇宙センター

加藤 學、JAXA「かぐや」サイエンスマネージャー

121  
2011. 12. 15



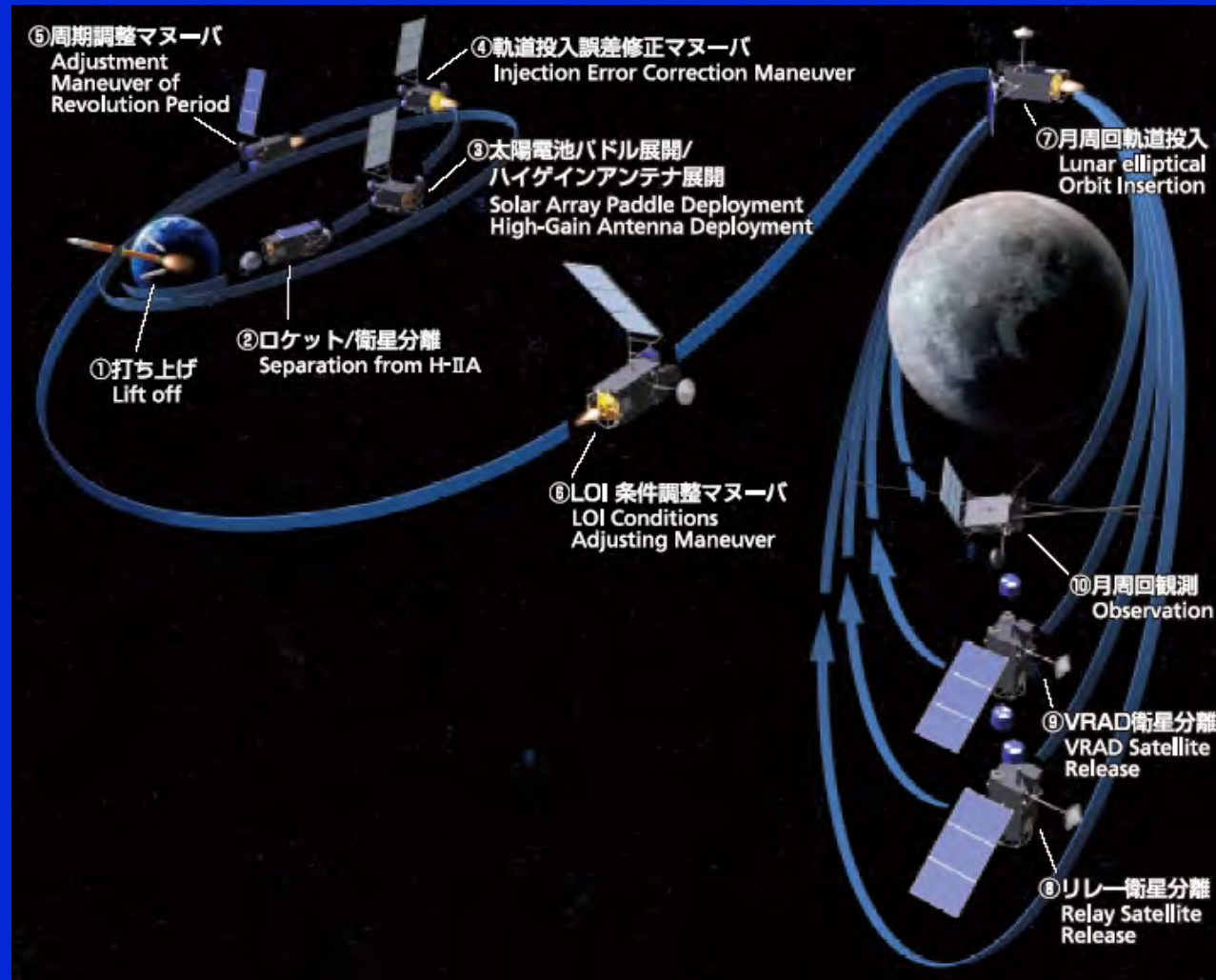
# Outline of Kaguya (SELENE) Mission

- **Spacecraft configuration:**  
Main orbiter Kaguya,  
Relay satellite (Rstar) Okina,  
and VRAD satellite (Vstar) Ouna
- **Mission period :** 1 year nominal and extended
- **Orbits :** Polar orbit  $i=90$  [deg]  
Main orbiter : 100 km x 100 km, circular  
Vstar : 100 km x 800 km, elliptical  
Rstar : 100 km x 2400 km, elliptical
- **Mass:** Total 3020 kg, wet  
Science instruments: ca. 300 kg  
Sub-satellites: ca. 50 kg each
- **14 Science instruments** onboard
- **Launch** by H2A No.13 rocket from TNSC





# Mission Profile from Launch to Nominal Observation Orbits



Phasing orbit should be applied for enhancing reliability of the insertion:  
2.5 cycles of Earth-Moon orbit

# アポロ計画でわかったこと

1969年、人類は初めて地球以外の天体の上を歩きました。それが月です。

1969年から1972年までNASA（アメリカ航空宇宙局）がすすめた「アポロ計画」では、宇宙飛行士が月面でさまざまな調査や実験を行いました。その結果、月は地球と同じおよそ45億年前に原始太陽系星雲のほぼ同じ場所でつくられたこと、38～40億年前に巨大な隕石が降り注ぎ、巨大なクレーターができたことなどがわかりました。

なかでも、合計387キログラムもの月の石を持ち帰ったことは、大きな成果となりました。それまでは月の表面を撮影するなど、観察するだけでしたが、月の石を直接調べることができたのです。

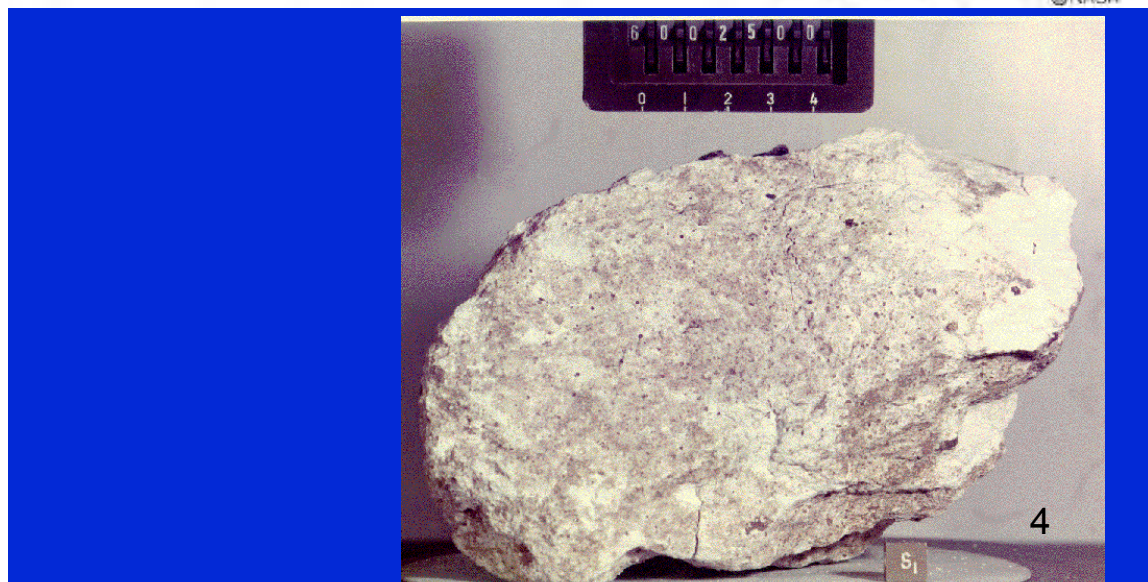
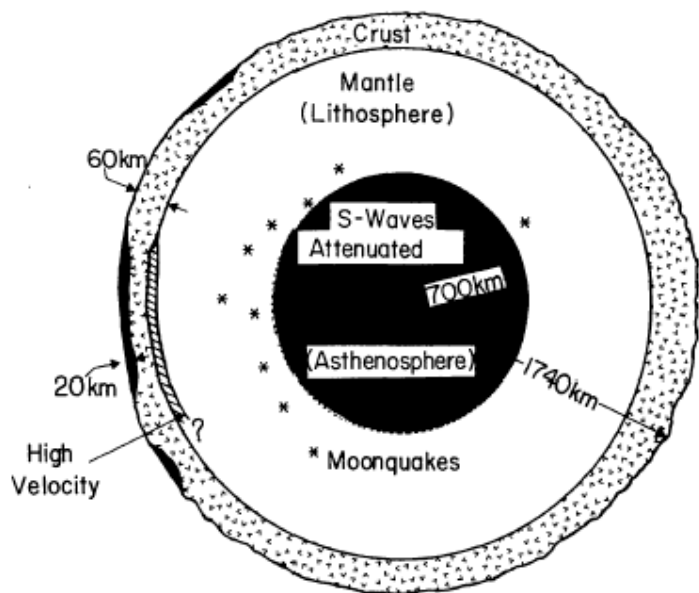
でも、月にはまだまだ、わからないことがいっぱいあります。



アポロ11号で人類は初めて月に降り立った。写真はオルドリフ宇宙飛行士 ©NASA

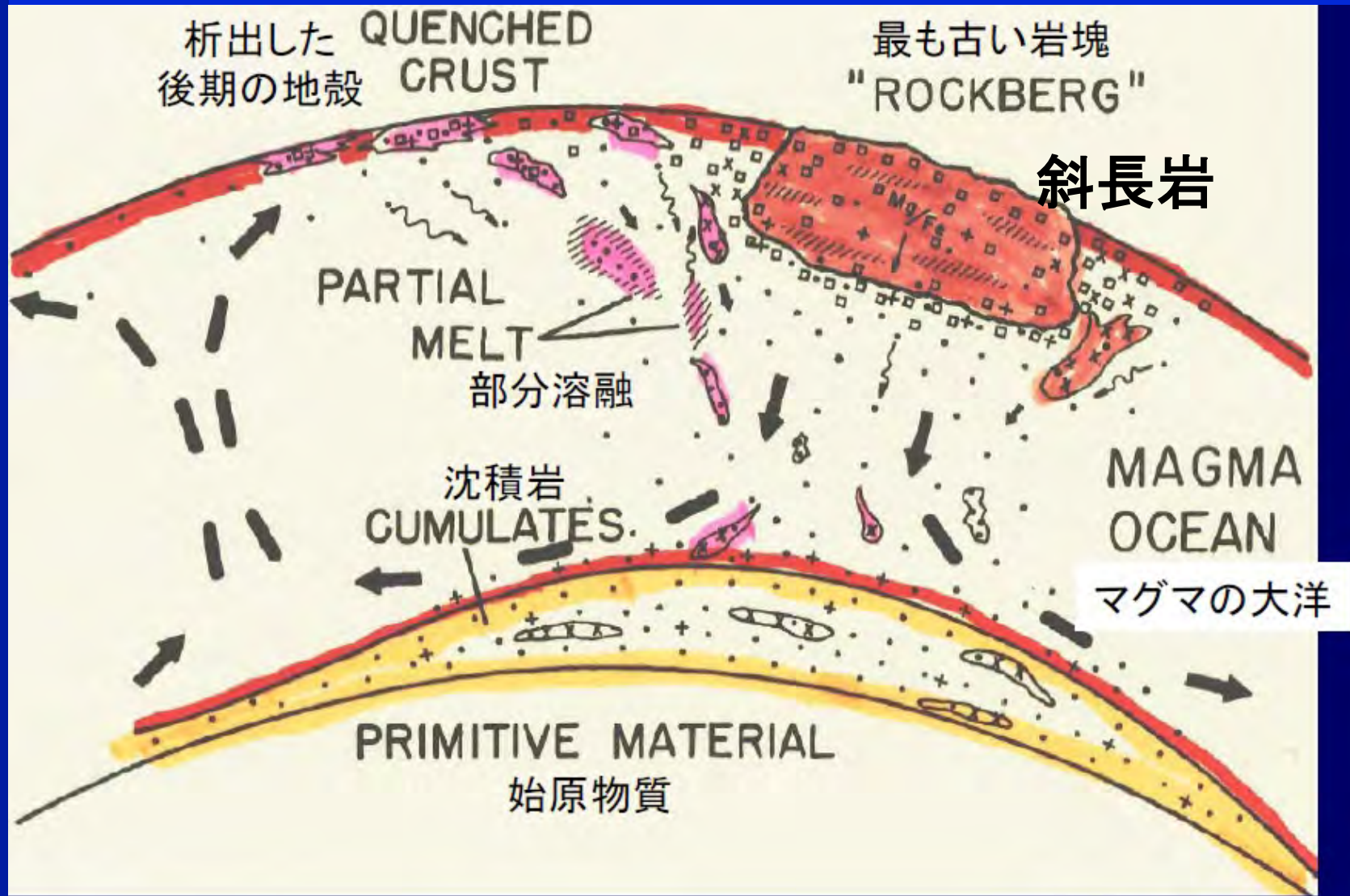


アポロ計画によって持ち帰られた月の石は、現在も研究が続けられている ©NASA





# マグマオーシャン





# 月の起源

## ジャイアントインパクト説

地球に火星サイズの原始惑星が衝突して、その破片が月になったとする説。

## 分裂説

地球の自転のいきおいによって、地球から物質が飛び出して月ができたとする説。

## 捕獲説

他の場所でできた月が地球の重力でとらえられたとする説。

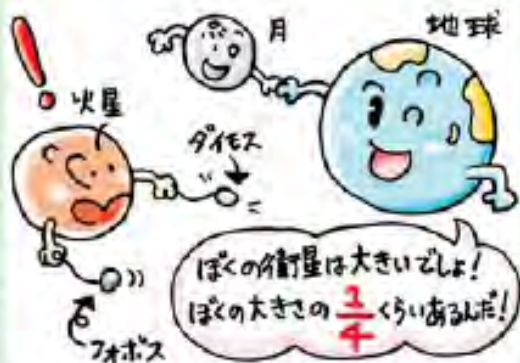
## 共成長説

月と地球は同じ場所で同じ時期に成長したとする説。

## 月の大きさは？

ナノ1

月は地球の1/4の大きさです。衛星を持つ太陽系の惑星の中で、惑星と衛星の大きさの比率をみると、月はとても大きい衛星になります。たとえば火星のふたつの衛星フォボスとダイモスは、火星の1/100の大きさしかないのです。



## 月のなかみは？

ナノ2

地球の内部は、コア(核)とマントルに大きく分かれています。コアは鉄やニッケルでできたかたまりです。マントルはコアのまわりを包む層で、地球の内部でゆっくり動いています。月も地球と同じようなつくりになっているのでしょうか？



## 月にマグマの海があった？

ナノ3

月の石の成分の研究から、月が誕生したところにはマグマ(岩石がどろどろにとけたもの)の海があったと考えられています。でも、本当に月にマグマの海があったのでしょうか？ また、それはどのくらいの規模だったのでしょうか？



## 月の磁場はなくなった？

ナノ4

地球では磁石が南北の方向を教えてくれます。これは、地球全体に磁場があるためです。月には地球のような磁場がありません。しかし、アポロ計画で持ち帰ってきた月の石を調べるとわずかに磁力があり、かつて月に磁場があったことがわかりました。月で磁場を発生させたしくみや、なぜそれがなくなってしまったのか、大きなナゾのひとつです。



# 地球から見えない月の裏側はどうなってるの?

ナゾ5

月をよーく目をこらして見てみると、月には明るいところと暗いところがあります。月の明るい部分は「高地」と呼ばれ、暗い部分は平らな地形で、水はありませんが「海」と呼ばれています。

また、地球からは月の表側しか見えません。地球から見えない月の裏側は、表側とはずいぶんちがいます。裏側はいん石の衝突でできた山のふん火口のようなデコボコ(クレーター)がたくさんあります。最近では地下のつくりもちがうことがわかってきました。どうして表と裏で地下のつくりがちがうのか、それもナゾのひとつです。



表



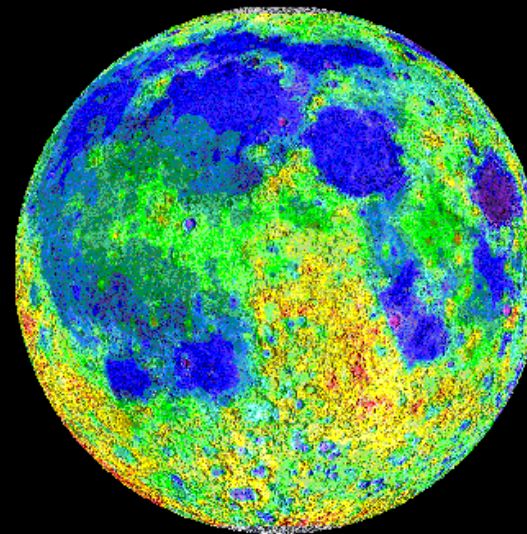
裏

SELenological and Engineering

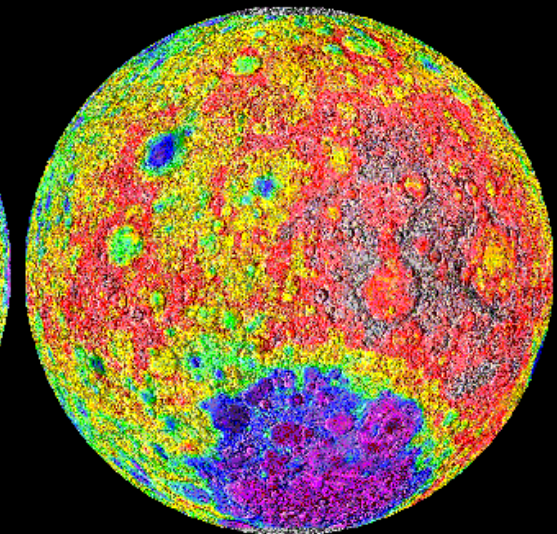
## 月の二分性

### Clementine Topographic Map of the Moon

Contour Interval - 500 m



Near Side



Far Side

-8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8

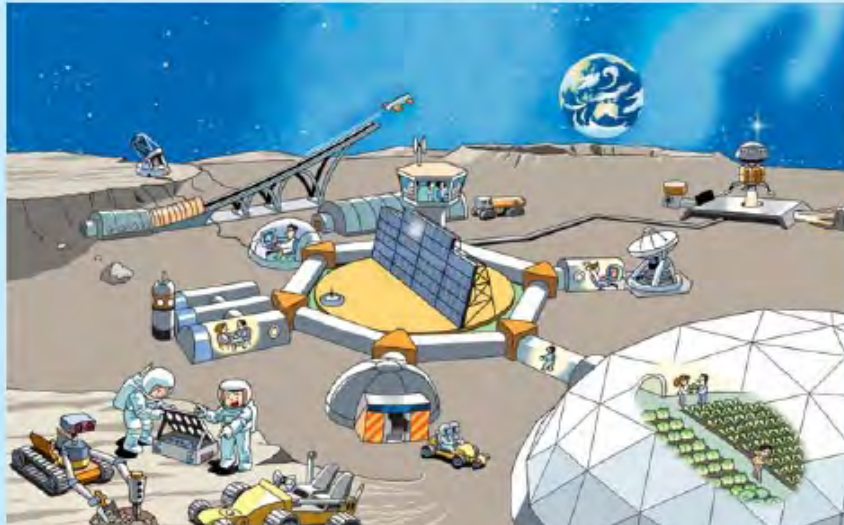
Kilometers



## 月の環境を調べる

月での  
科学

地球には大気がありますが、月にはありません。そのため、太陽の光は月の表面に直接届いています。「かぐや」は約1年間、月のまわりを回りながら、いろいろな観測機器を使って、太陽が月にどんな影響をあたえているかなど、くわしく調べます。このような観測結果は、将来、月面基地をつくるなど、人類が月で活動するための重要な情報にもなることでしょう。



月からの  
科学

## 月から宇宙を探る

「かぐや」には、月以外の観測を行う機器も積まれています。月は太陽が地球にあたえる影響を調べるのに、いちばん良い場所です。たとえば、太陽の影響によって地球の北極と南極あたりで発生するオーロラの活動を、月から同時に観測します。また、地球ではテレビや携帯電話などの電磁波が飛びかっているため、宇宙からの

電磁波を調べるのは困難です。しかし、月は地球からの電磁波を受けないので、宇宙のさまざまな電磁波を調べるのにもとても良いところ

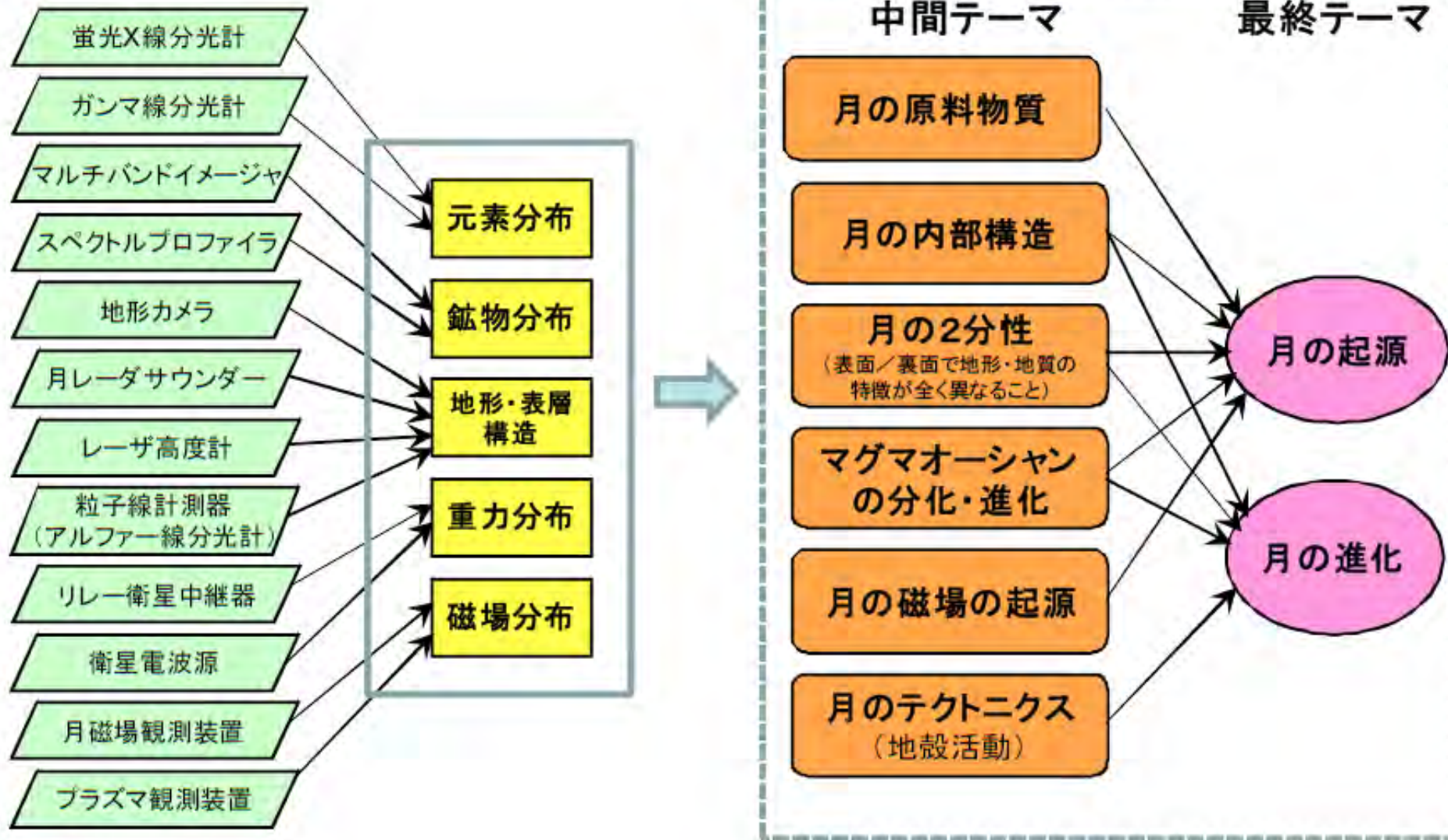
です。  
また、ハイビジョンカメラで、青く美しい地球が月の地平線から現れる「地球の出」を、きれいな映像で撮影します。





# 「かぐや」観測機器、めざす月の科学

## 月の科学





## Kaguya (SELENE) Mission Objectives

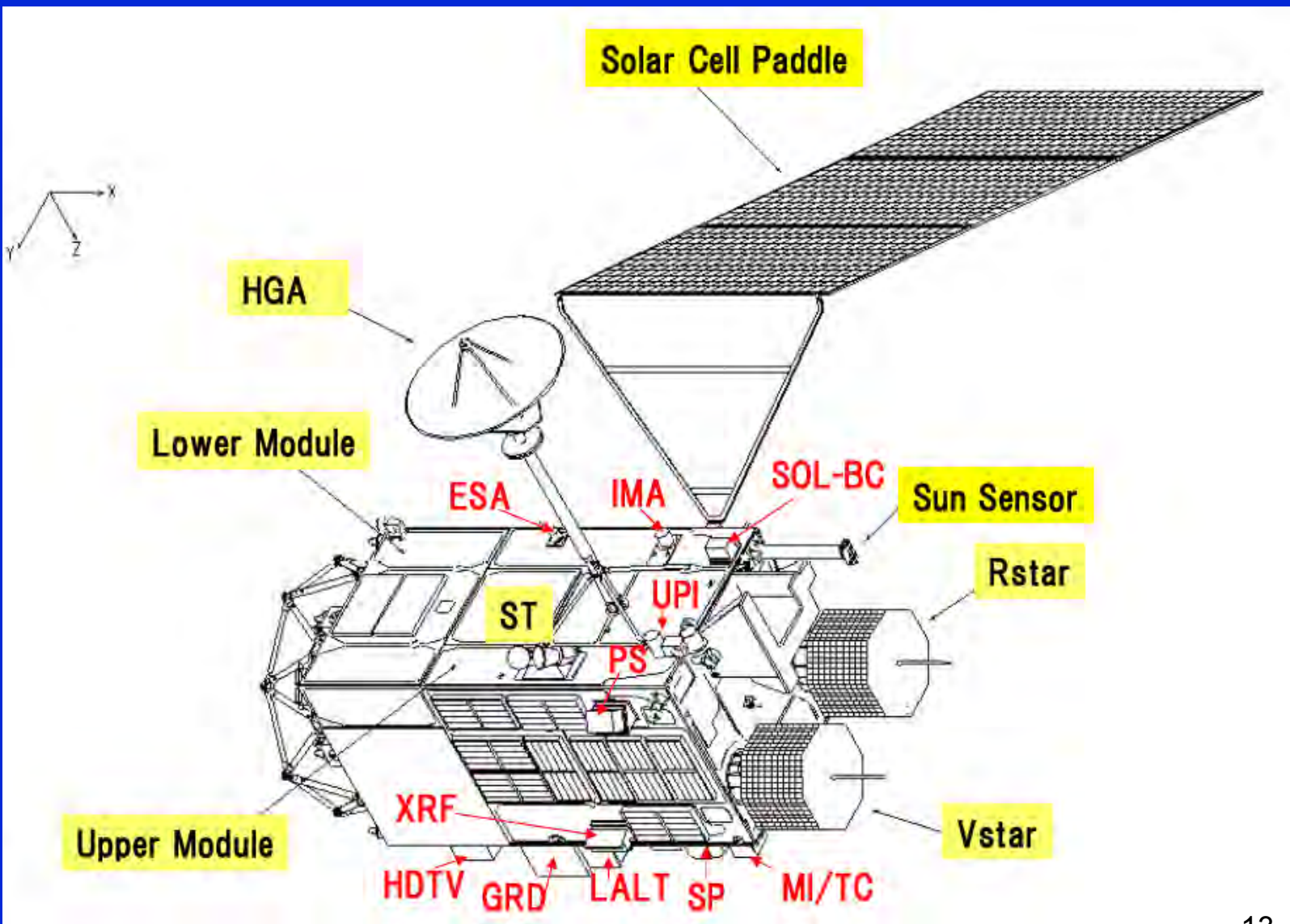
- **Global survey of the Moon**  
Composition, 3D-Topography, Gravity, Magnetic Field, Lunar environment
- **Technology development for future lunar exploration**  
Lunar insertion, Orbital correction maneuver, Telecommunication
- **Public outreach of the lunar exploration**  
Broadcasting High-Definition TV movie of the Earth-rise/lunar surface

## Kaguya (SELENE) Science Mission and Instruments

<b>X-ray Spectrometer (XRS)</b>	Global mapping of Al, Si, Mg, Fe distribution using 100 cm <sup>2</sup> CCD, spatial resolution 20 km, Energy range 0.7-8 keV, 5 μm Be film, Solar X-ray monitor
<b>Gamma-ray Spectrometer (GRS)</b>	Global mapping of U, Th, K, major elements, distribution using 250 cm <sup>3</sup> large pure Ge crystal, Spatial resolution 160 km, Energy range 0.1-10 MeV
<b>Multi-band Imager (MI)</b>	UV-VIS-NIR CCD & InGaAs imager, spectral bandwidth from 0.4 to 1.6 microns, 9 bands filters, spectral resolution 20-30 nm, spatial resolution 20-60 m
<b>Spectral Profiler (SP)</b>	Continuous spectral profile ranging from 0.5 to 2.6 microns, spectral resolution 6-8 nm, spatial resolution 500 m
<b>Terrain Camera (TC)</b>	High resolution stereo camera, spatial resolution 10 m
<b>Lunar Radar Sounder (LRS)</b>	Mapping of subsurface structure using active sounding, frequency 5 MHz, echo observation range 5 km, resolution 75 m, Detection of radio waves (10k-30MHz) from the Sun, the Earth, Jupiter, and other planets
<b>Laser Altimeter (LALT)</b>	Nd:YAG laser altimeter, 100 mJ output power, height resolution 5 m, spatial resolution 1600 m with pulse rate 1 Hz, Beam divergence 3 mrad
<b>Differential VLBI Radio Source (VRAD)</b>	Differential VLBI observation from ground stations, selenodesy and gravitational field, onboard two sub-satellites, 3 S-bands and 1 X-band
<b>Relay Satellite Transponder (RSAT)</b>	Far-side gravimetry using 4 way range rate measurement from ground station to orbiter via relay satellite, perilune 100 km, apolune 2400 km in altitude, Doppler accuracy 1 mm/s
<b>Lunar Magnetometer (LMAG)</b>	Magnetic field measurement using flux-gate type magnetometer, accuracy 0.5 nT
<b>Charged Particle Spectrometer (CPS)</b>	Measurement of high-energy particles, 1-14 MeV(LPD), 2-240 MeV(HID), alpha particle detector, 4-6.5 MeV
<b>Plasma Analyzer (PACE)</b>	Charged particle energy, angle and composition measurement, 5 eV/q – 28 keV/q
<b>Radio Science (RS)</b>	Detection of the tenuous lunar ionosphere using S and X-band carriers
<b>Plasma Imager (UPI)</b>	Observation of terrestrial plasmasphere from lunar orbit, XUV(304A) to VIS
<b>High Definition TV System</b>	<b>Public Outreach</b>

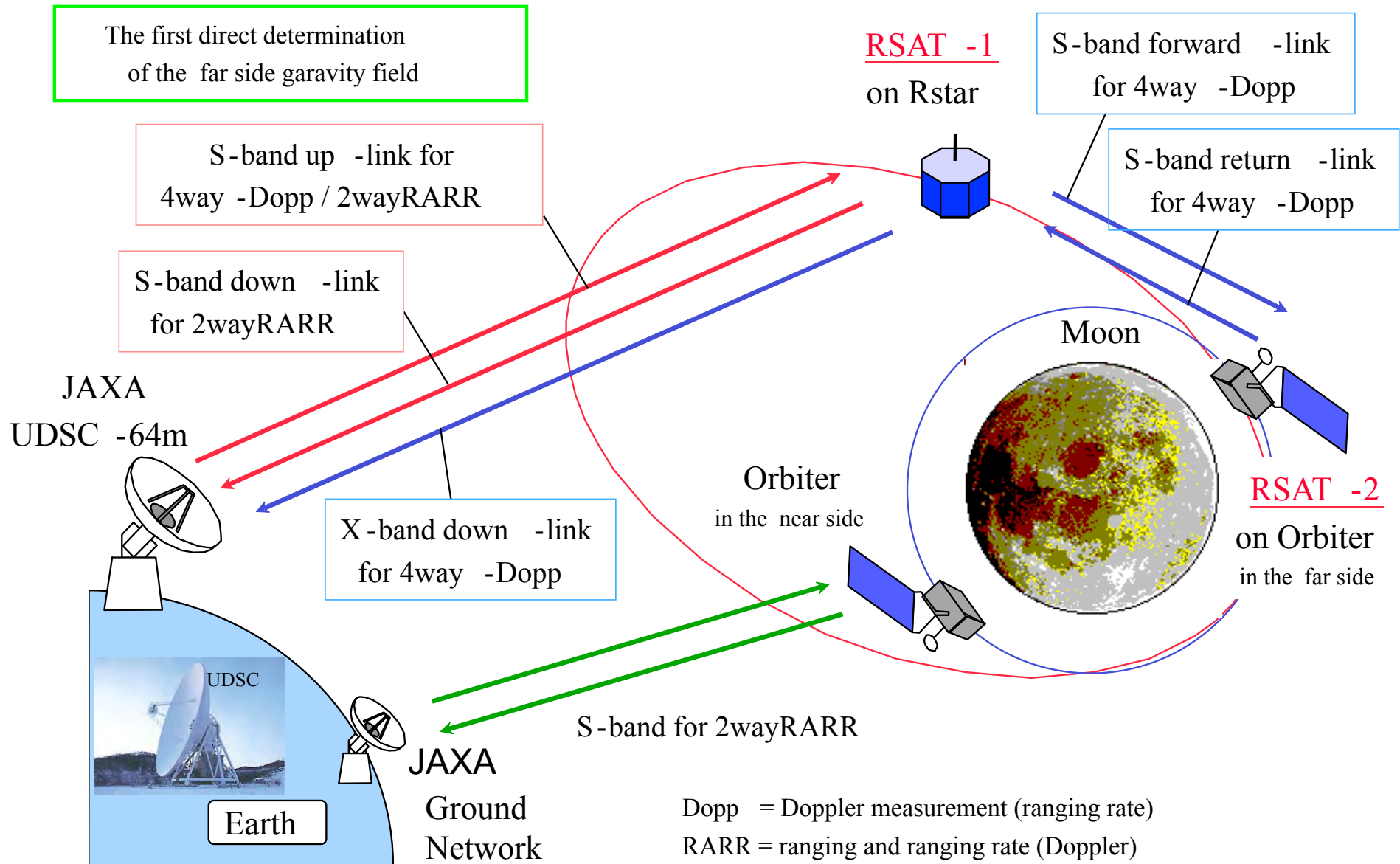


# Kaguya (SELENE) Configuration before separation of sub-satellites



RSAT: 4-way Doppler measurement using

Relay Satellite Transponder



The first direct determination of the far side gravity field

S-band up-link for 4way -Dopp / 2wayRARR

S-band down-link for 2wayRARR

RSAT -1 on Rstar

S-band forward-link for 4way -Dopp

S-band return-link for 4way -Dopp

JAXA UDSC -64m

X-band down-link for 4way -Dopp

Orbiter in the near side

RSAT -2 on Orbiter in the far side



Earth

JAXA Ground Network

S-band for 2wayRARR

Dopp = Doppler measurement (ranging rate)  
RARR = ranging and ranging rate (Doppler)



## HDTV Earth Views in May 9, 2008



and ENG

## HDTV Crescent Earth in Jan. 27, 2008





SELenological and ENgineering Explorer

ロッチ、2007-9-14 T10:31:01 日本標準時



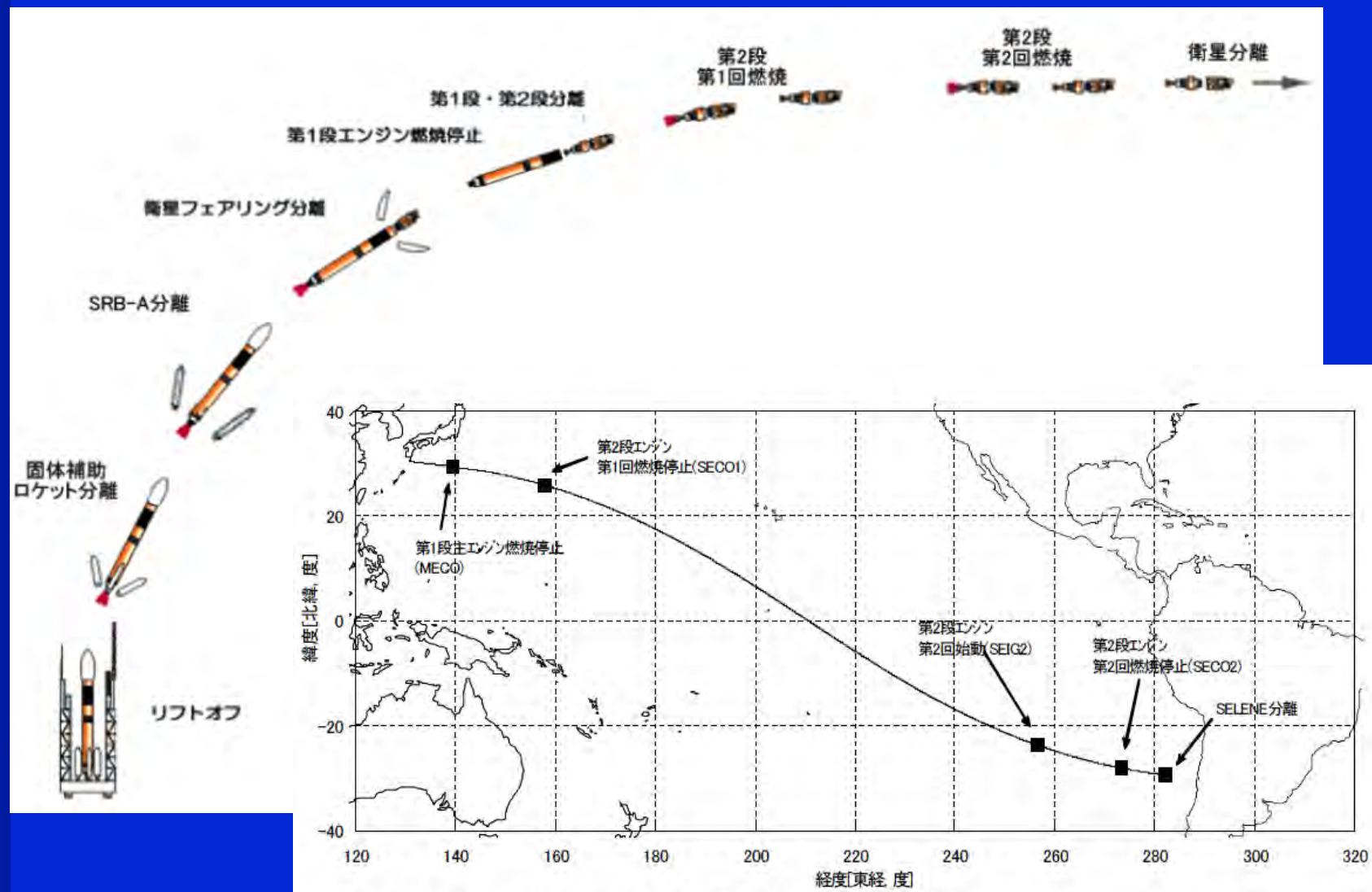
種子島宇宙センター

16





# 飛行経路



注) 13号機は月遷移軌道投入ミッションであり、打上げ日によりSECO1～SEIG2の慣性飛行期間が変動することから、代表ケースとして慣性飛行期間最長ケースを示した。

# R o a d t o t h e M o o n

## かぐや 月までの道のり

### 1 打ち上げ・衛星分離

H-IIAロケットにより10.5km/sまで加速され、周回約5日・遠地点約23万kmの長楕円軌道（第1周回）に投入。

### 2 太陽電池パドルなどを展開

太陽電池、アンテナ展開、三軸姿勢制御確立などを行う。

### 3 マヌーバ（軌道投入調整修正）

「かぐや」の位置や速度を電波を使って精密に測定。それに基づいてスラスタを噴射する方向と量を決め、命令を送り、軌道の調整を行う。

### 4 マヌーバ（周回調整）

第2周回では遠地点約40万kmで約10日の周期を持つ楕円軌道に投入される。月までの平均距離は約36万kmなので、それより遠い位置まで到達することになる。第1周回の終わりの近地点（ペリジ）での噴射量を調整することで、第2周回の時期を変えることができる。第2周回は、月軌道投入の精度を高めると同時に、打ち上げ日の変更に伴う軌道の違いを調整するバッファードとしても機能する。

### 5 マヌーバ（月周回条件調整）

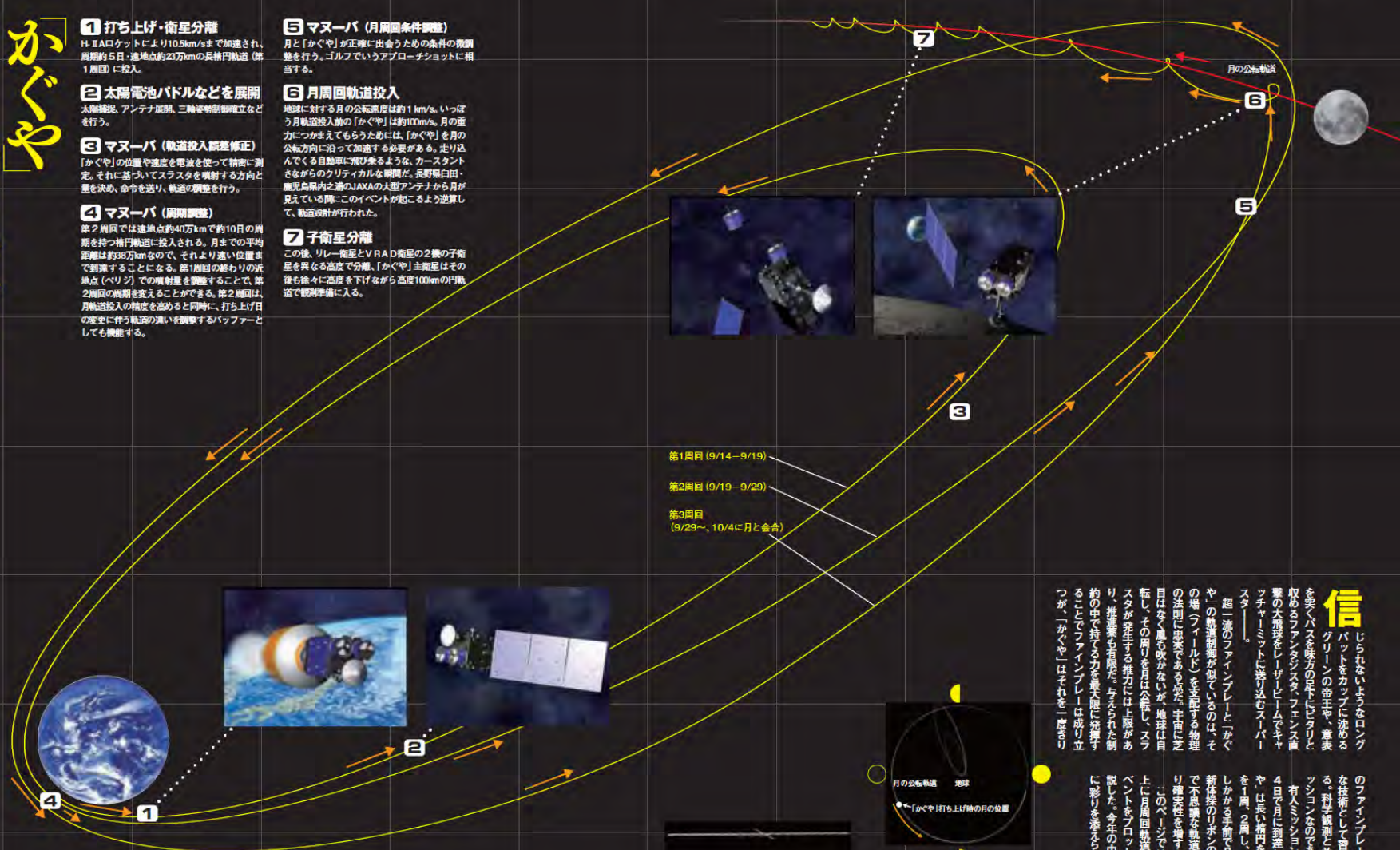
月と「かぐや」が正確に出会うための条件の微調整を行う。ゴルフでいうアプローチショットに相当する。

### 6 月周回軌道投入

地球に対する月の公転速度は約1km/s。いっぽう月軌道投入前の「かぐや」は約100m/s。月の重力につかまえてもらうためには、「かぐや」を月の公転方向に沿って加速する必要がある。走り込んでくる自動車に飛び乗るような、カーサントさながらのクリティカルな瞬間だ。長野県白田・鹿児島県内之浦のJAXAの大型アンテナから月が見えている間にこのイベントが起こるよう逆算して、軌道設計が行われた。

### 7 子衛星分離

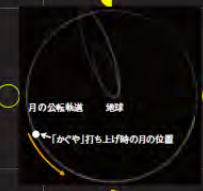
この後、リレー衛星とVIRA D衛星の2機の子衛星を異なる高度で分離。「かぐや」主衛星はその後も徐々に高度を下げながら高度100mの円軌道で観測準備に入る。



第1周回 (9/14-9/19)  
第2周回 (9/19-9/29)  
第3周回 (9/29-、10/4に月と合点)



月の公転面上から見た軌道の全体図  
「かぐや」の長楕円軌道の軌道面は赤道面から約30度傾いている。



北極の上空から見た軌道の全体図  
「かぐや」の打ち上げから月到達までの間に、月の周りを約4分の3周することになる。月到達するまではほぼ全期間で、地球から見た「かぐや」は月とは違う方向にしていることになる。

**信** じられないようなロングバットをカップにぶちやる。グリーン・の帝王、キマを突くパスを味方の守にぶくりと収めるファンタジスタ、フェンス直撃の大飛球をレジービームキャッチャーに押し込むスーパースター……

超一流のフライングと「かぐや」の精密制御が似ているのは、その機「フィールド」を支配する物理の法則に委ねられている。宇宙芝目はなく、風や吹かないが、地球が自転し、その周りを月は公転し、スラスタが発する推力には上限があり、推進薬も有限だ。与えられた制約の中で、持ちうる力を最大に発揮することによってフライングは成り立つが、「かぐや」はそれを一度きり

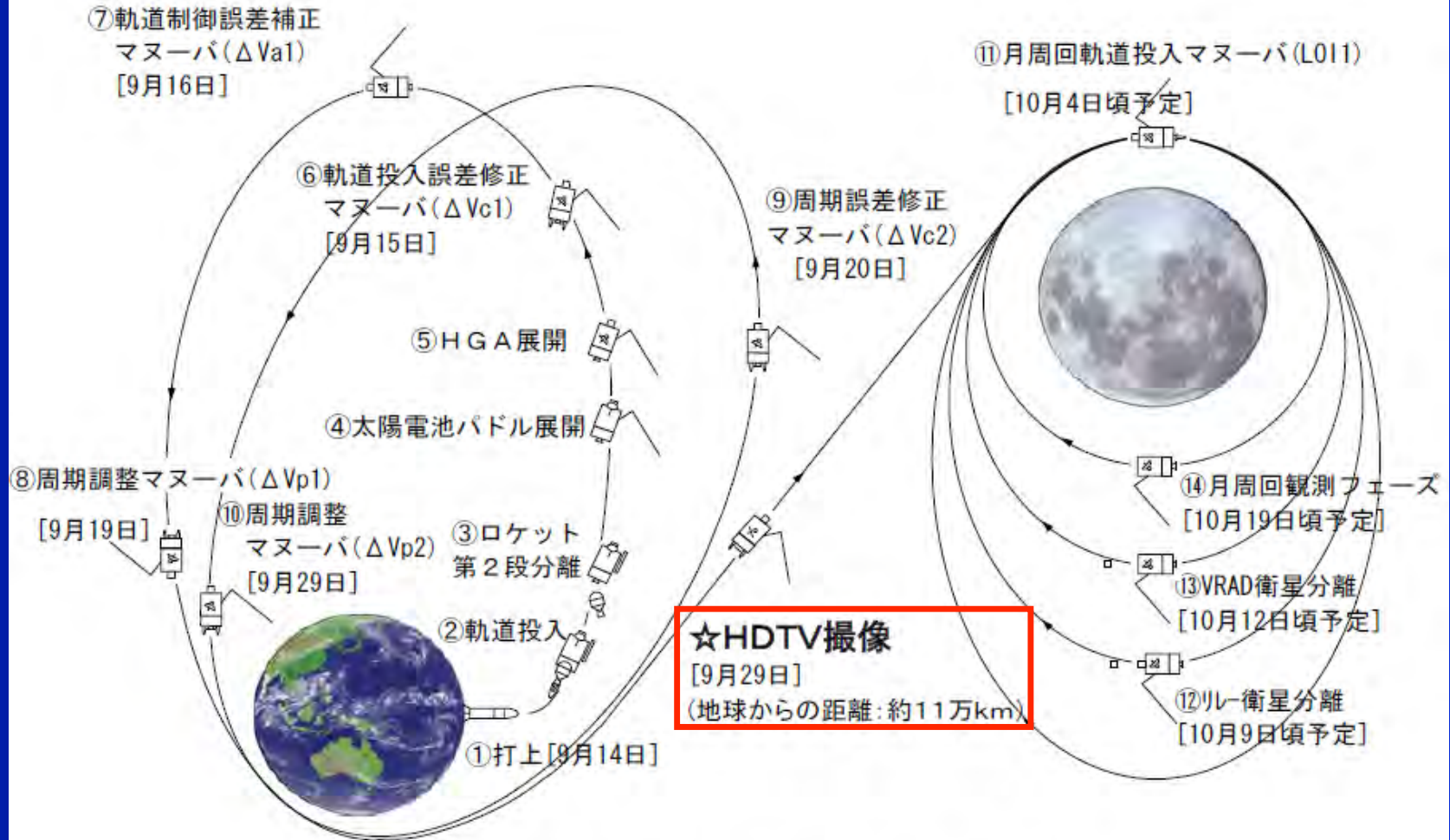
のフライングでなく、再現可能な技術として習得しようとしている。科学、観測と並ぶ「かぐや」のミッションなのである。

有人ミッションであるアポロは約4日自力で到達した。一方の「かぐや」は長い楕円を描いて地球の周りを1周、2周し、3周目の半ばにさしかかる手前で月に出会う。まるで新体操のリボンの軌跡のような複雑で不思議な軌道をたどるのは、より確率性を増すためだ。

このページでは「かぐや」の軌道以上に月周回軌道投入までの主要イベントをプロットし、原を辿って解説した。今年中秋の各月の味わいに彩りを添えられたいである。  
(文・西条光広)



# 打ち上げから月軌道投入まで



「かぐや (SELENE)」の月までの道のり (模式図)



# HDTV画像1. 遠ざかる地球



# モニターカメラによる初めての月の姿



2007-10-5. 5:50:00  
Alt.: 1500 km



2007-10-5. 6:00:00  
Alt.: 1200 km

SELenolog



2007-10-05 06.10 UT, 高度800 km

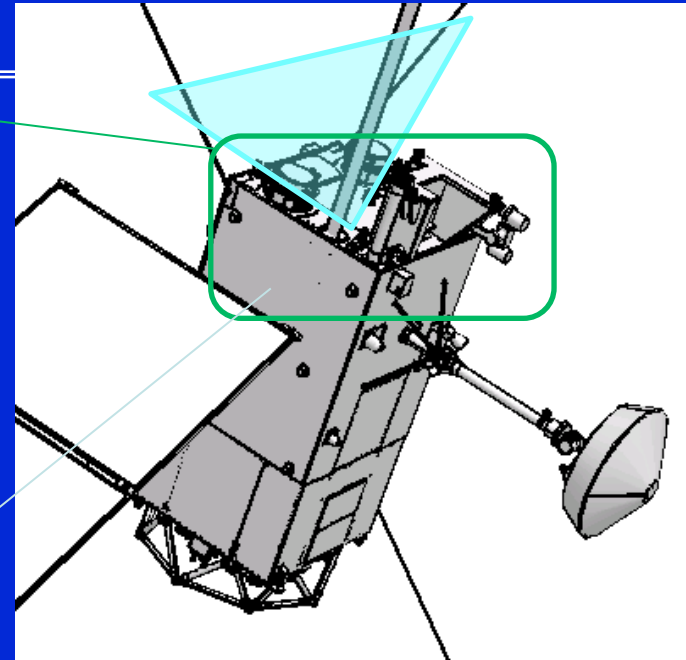
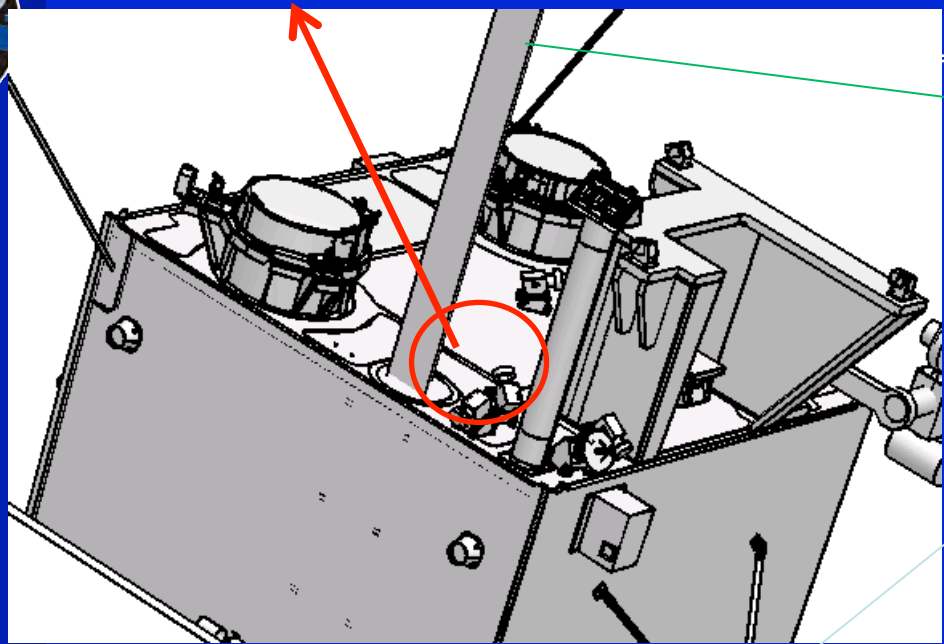




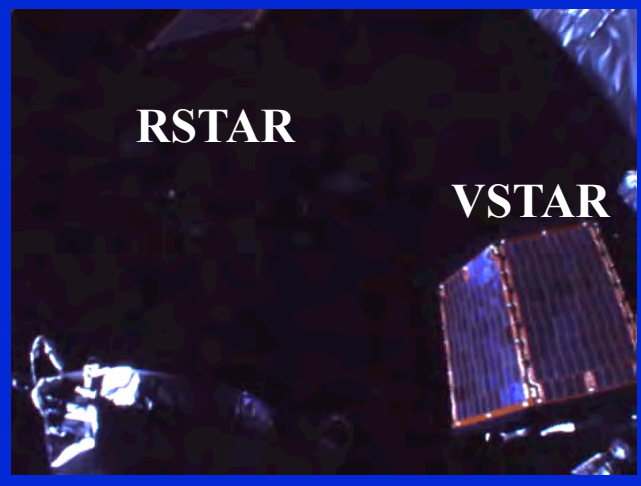
SELenological and Engineering Explorer

# RSTAR (おきな)の分離 10/9

Camera FOV



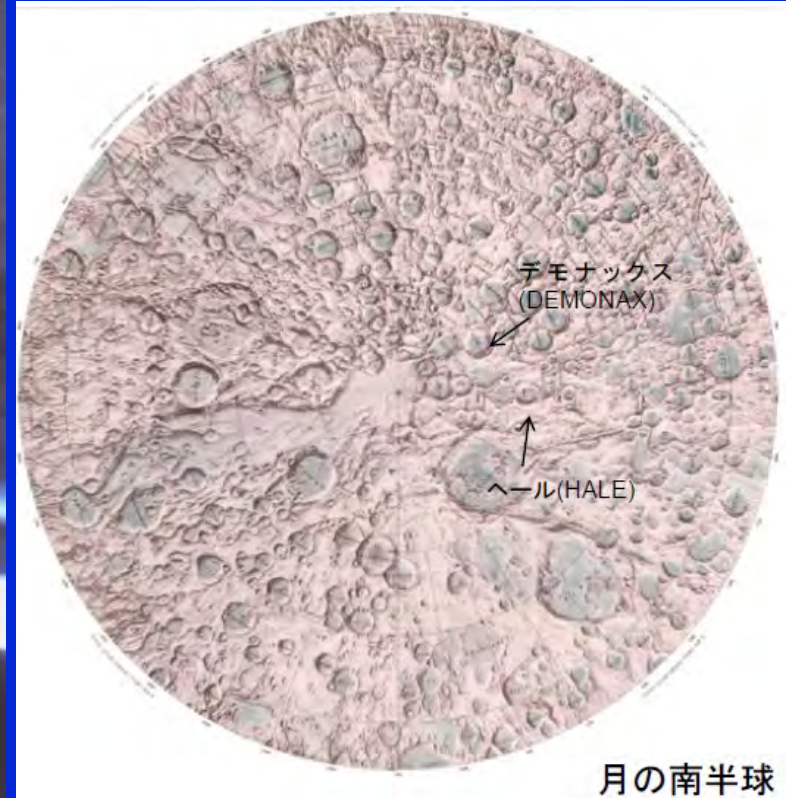
Before separation



After separation



# 高度100kmへ入った直後の月面



SELE

South hemisphere





# 「かぐや」のイベント

2007年

9.14 打上げ

9.19 1周目近地点通過

9.29 2周目近地点通過

10.4 月(長楕円)軌道投入

10.9 リレー衛星「おきな」分離

10.12 VRAD衛星「おうな」分離

10.19 月円軌道投入

10.28 LMAGマスト伸展

10.29 LRSアンテナ伸展

10.30 UPI展開

11.1 観測機器機能確認開始

12.21 定常観測開始

2008年 2.20 月食

4.3 ヨーアラウンド

8.16 月食

10.7 ヨーアラウンド

10.31 定常観測終了

11.1 後期観測開始

2009年 2.1 低高度観測開始

2.12 おきな裏側に衝突

6.11 かぐや制御落下

6.29 おうな通信停止



© JAXA/NHK



# レーザ高度計 LALT



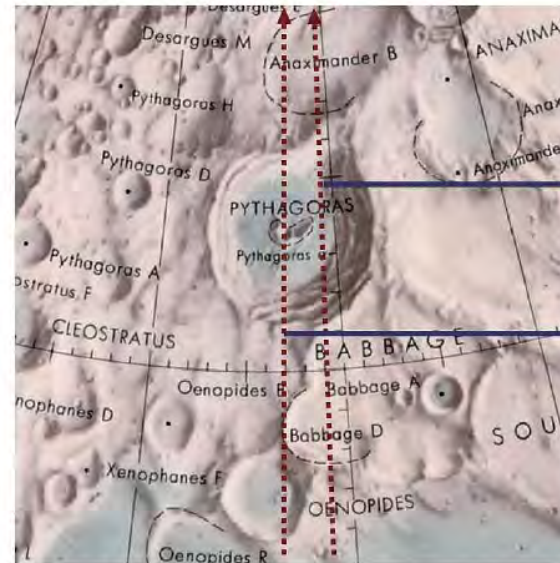
図1: LALT-E外観(左)と放熱板側から見たLALT-TR(右)

表1: LALT仕様及び性能表

諸元	数値
質量 (総計)	19.09 kg
(LALT-TR)	15.34 kg
(LALT-E)	3.75 kg
サイズ (LALT-TR)	360mm*450mm*408mm
々 (LALT-E)	241mm*301mm* 88mm
消費電力	44.2 W
レーザタイプ	Diode pumped, Q-switched, Cr doped Nd:YAG laser
波長	1064+/-1 nm
パルスエネルギー	100+/-5 mJ
レーザパルス頻度	1Hz or 0.5Hz
軌道沿い分解能	1.54 km or 3.08 km
時間パルス幅	17+/-3 nsec. (FWHM)
レーザコリメータ	ガリレオ式屈折 口径: 73mm
ビーム拡がり角	0.4+/-0.1 mrad
受信用望遠鏡	カセグレン式反射, 口径: 100mm
望遠鏡視野	1mrad
測距値分解能	1m
測距距離	50~150 km or 0~150km
測距精度(*)	5m

\* 時間パルス幅17 nsec.に相当.

Pythagoras(N63.5, W63.0);  
Nov. 25, 2007



Lunar and Planetary Institute  
<http://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/>

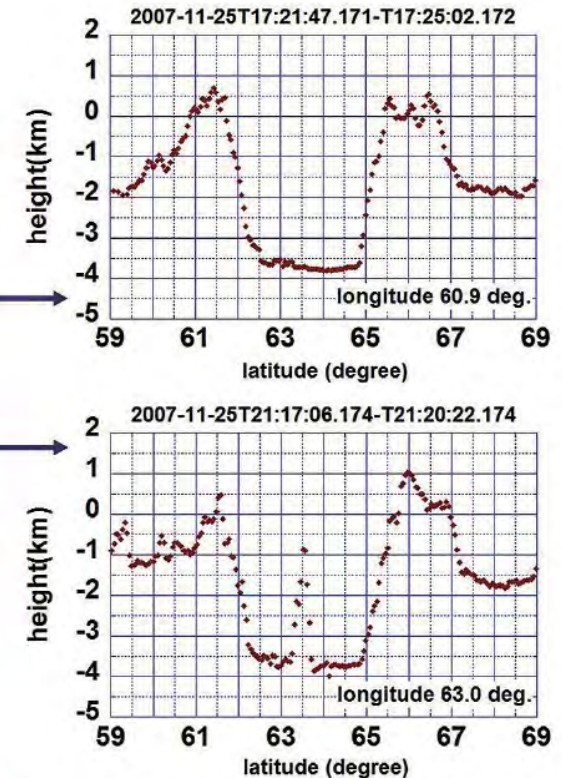
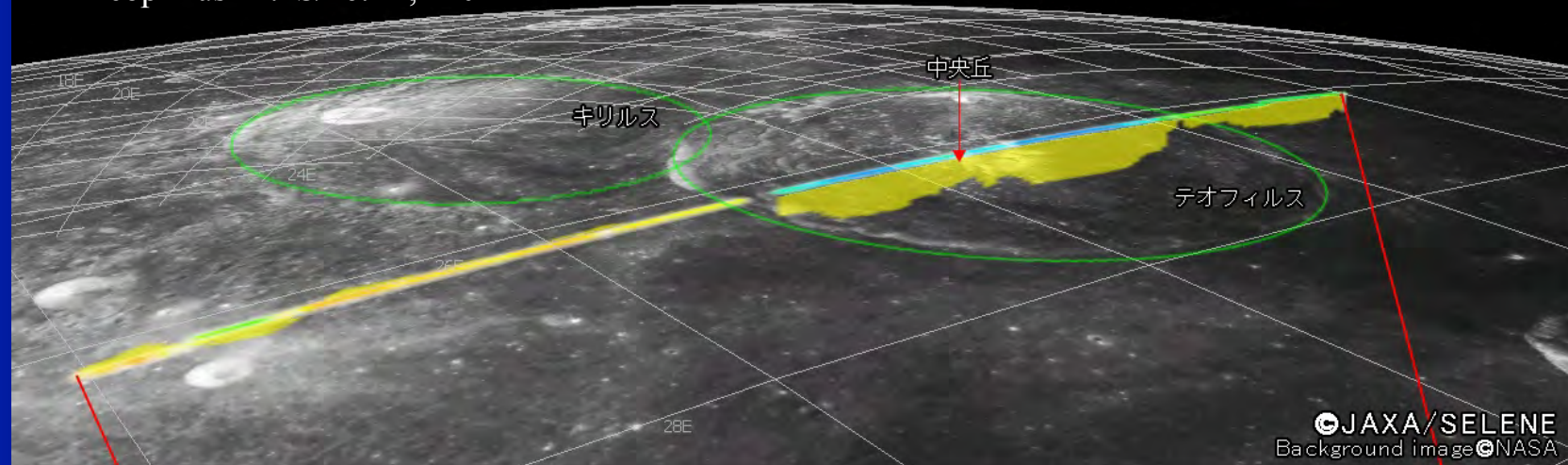


図2: LALT初観測時のピタゴラスクレータ高度プロファイル.測線が中央丘を横切る場合とそうでない場合の違いが捉えられている.



# レーザ高度計 (LALT) によるクレータ観測

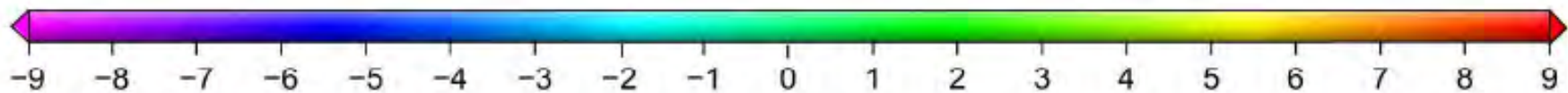
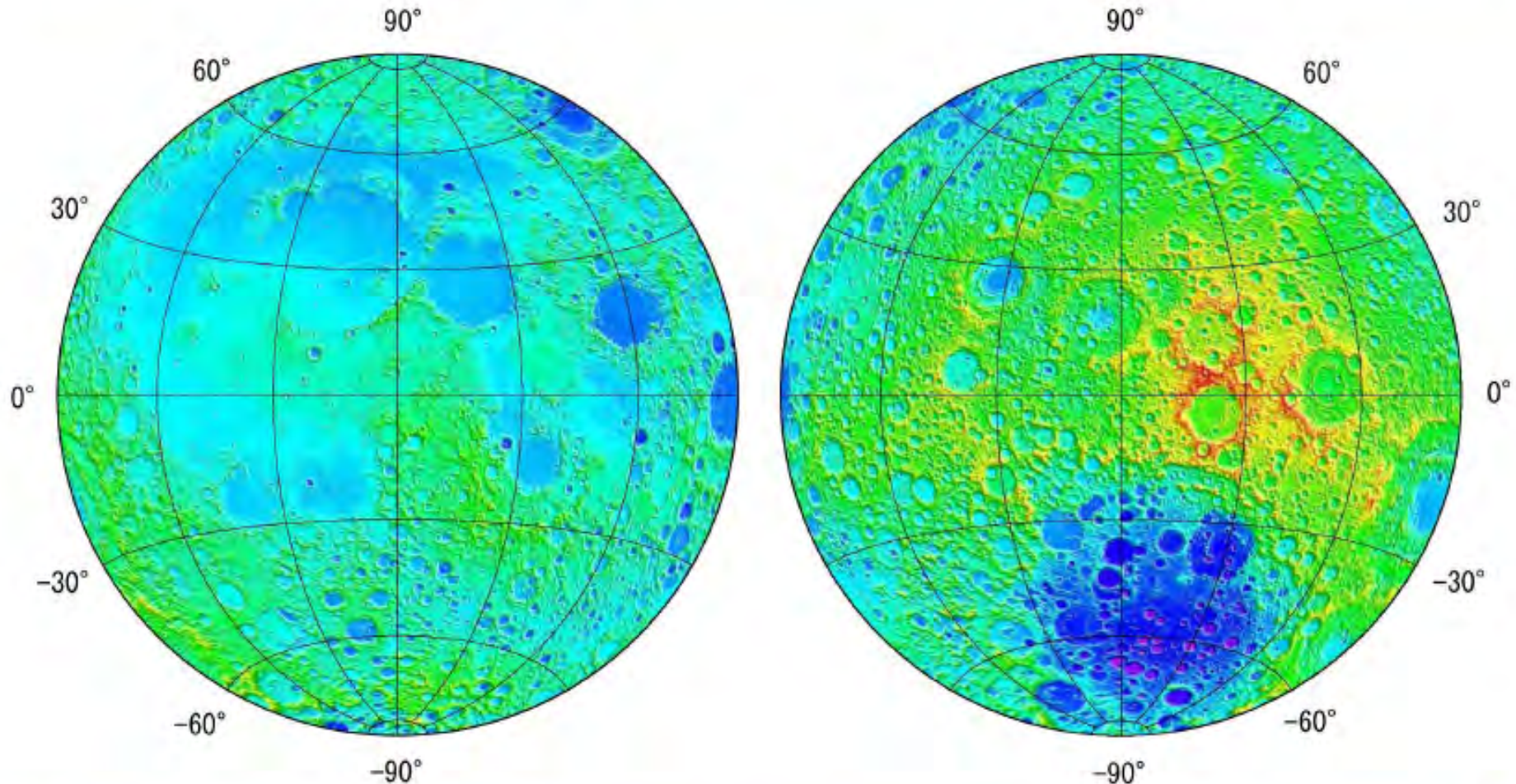
Theophilus 11.4S/26.4E, 110km



# Lunar Shaded Topographic Map (~30. June, 2008)

Near Side

Far Side

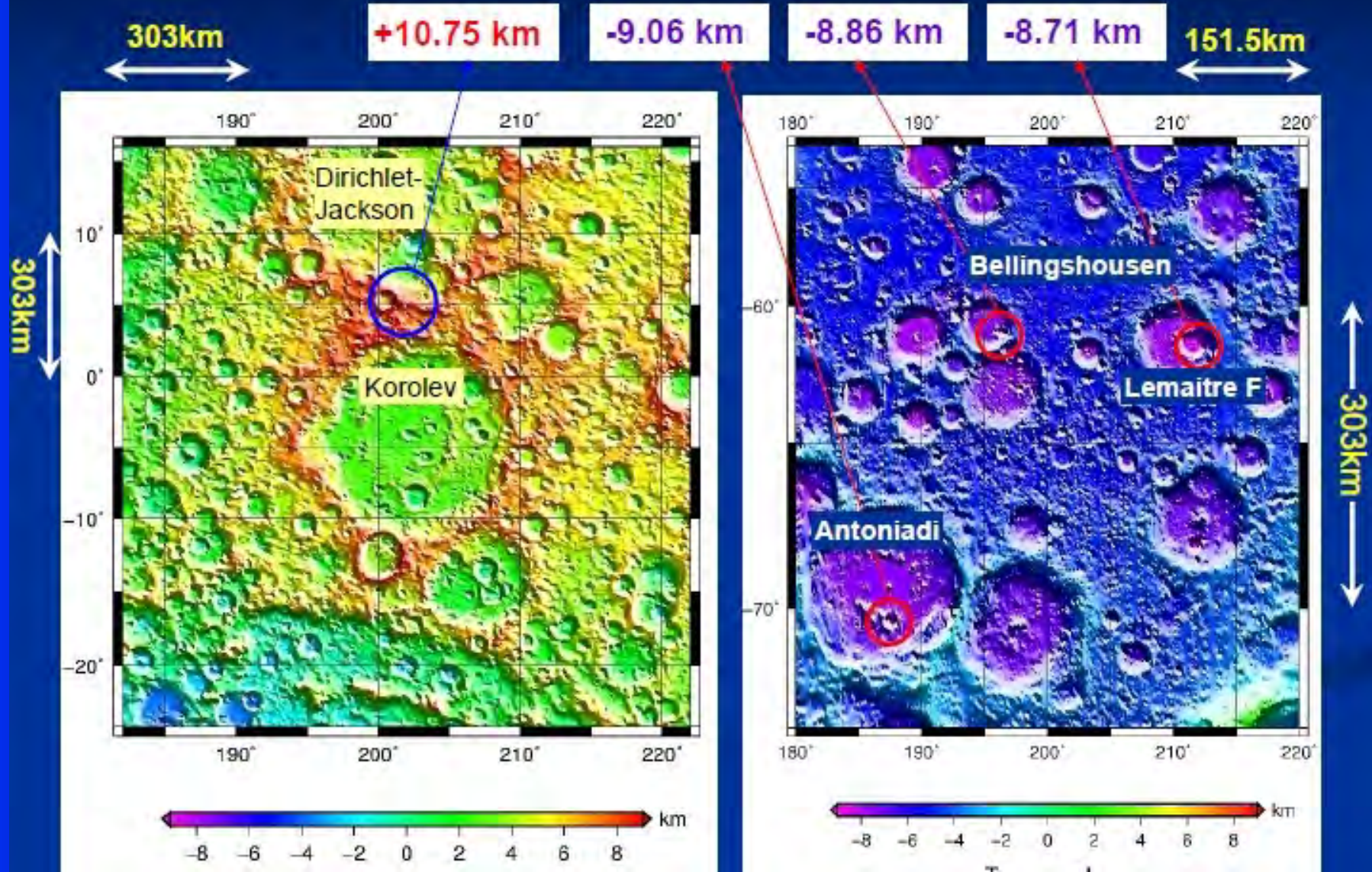


ME/PA: 1737.4km

Topo [km] Lambert Azimuthal Equal Area Projection

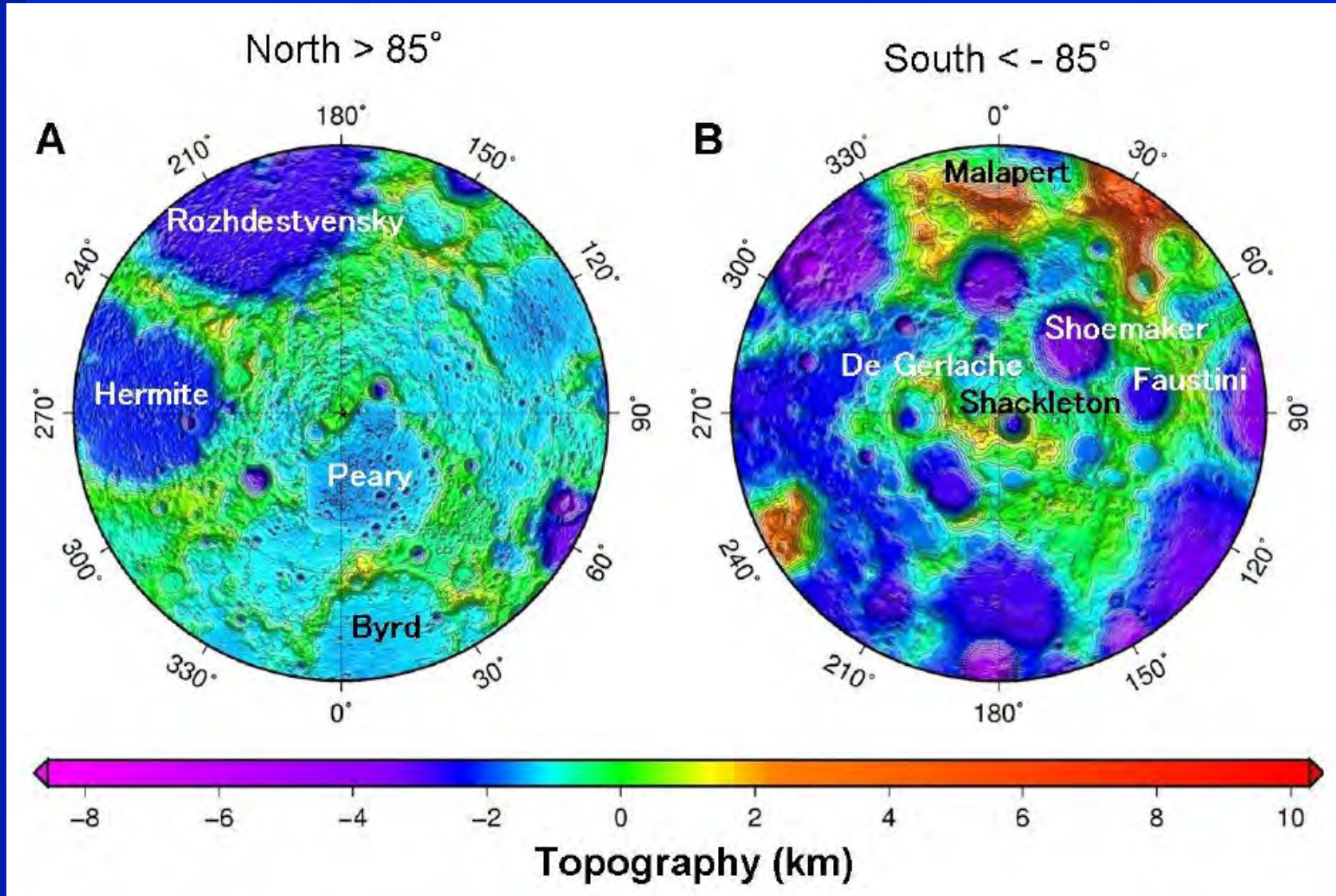
# The Highest and Lowest Points

- with respect to the reference sphere ( $R=1737.4\text{km}$ , COM origin) -

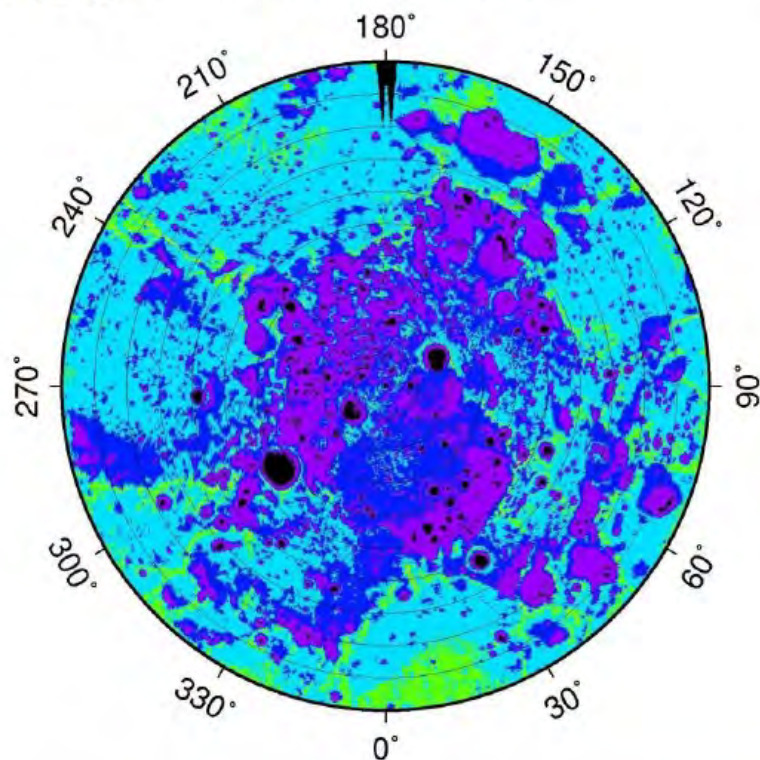




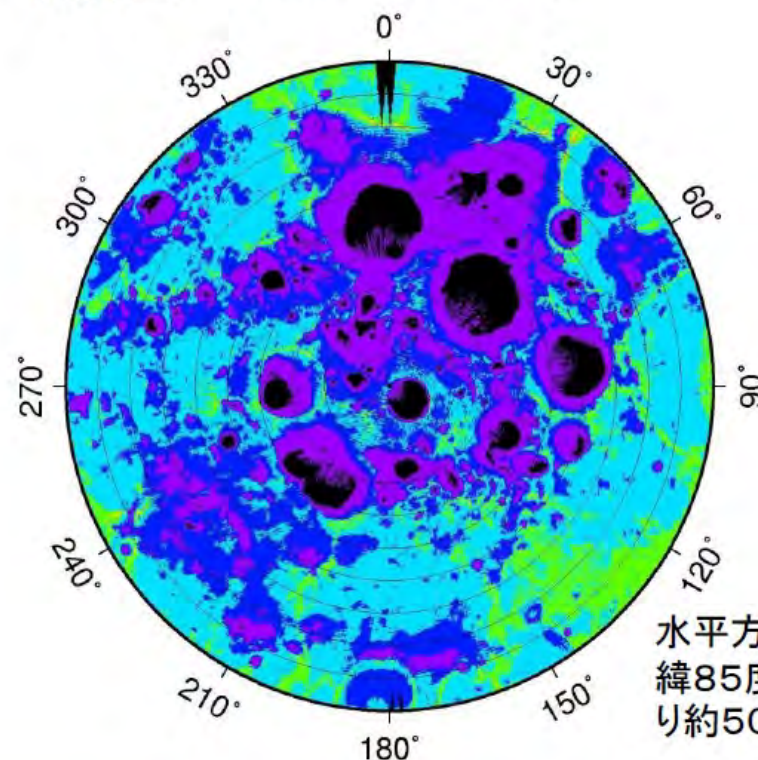
# 極域のLALT観測



## 北極 North>85



## 南極 South<-85



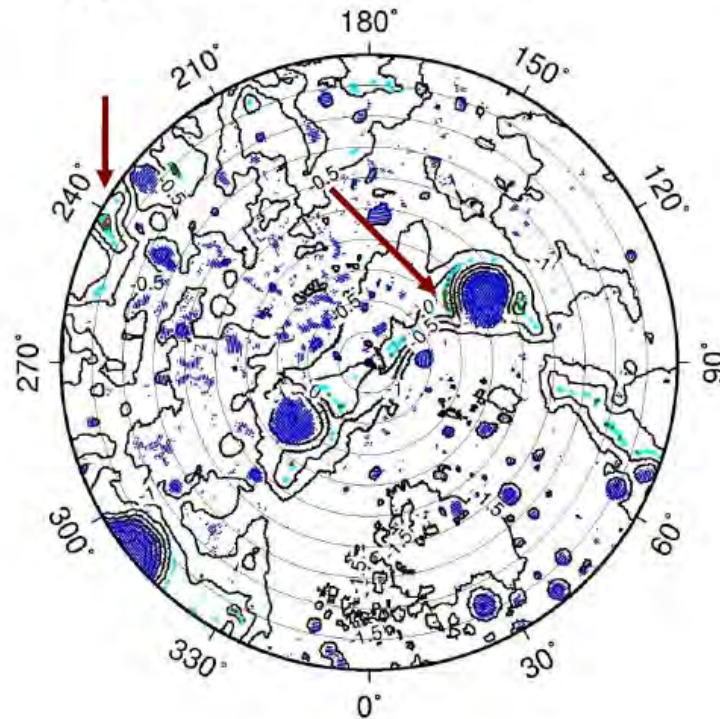
水平方向分解能は北緯85度で1画素あたり約500mx500m。



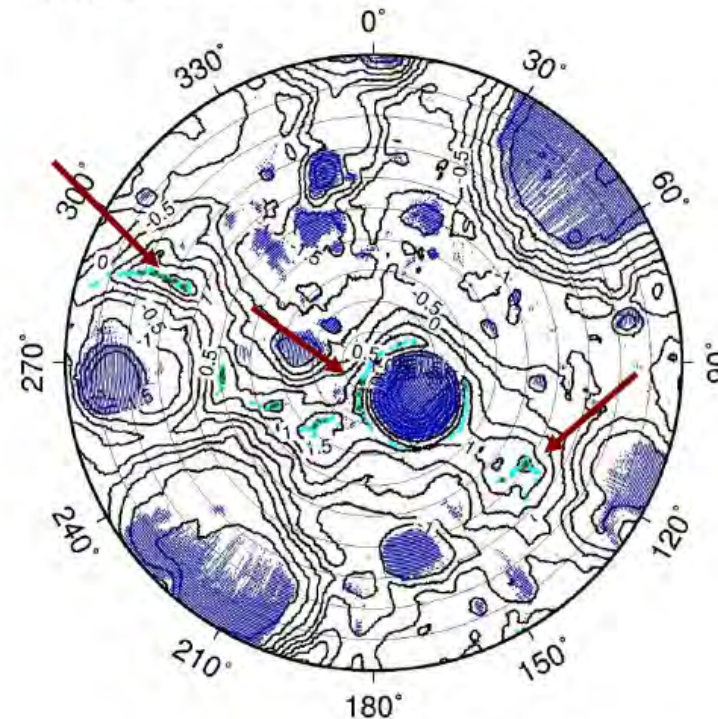
- 黒い部分が「永久日影」領域、ただし2次散乱光は考慮していない。
- 面積は北、南それぞれ1236km<sup>2</sup>、4466km<sup>2</sup>で、クレメンタインなどのこれまで研究による面積の見積もりから変化はあまりない。

# 88度以北(以南)拡大図

北極 North > 88



南極 South < -88



- 80%以上の領域はクレータ周縁(リム)の限られた部分のみに存在する(矢印)。

>80% 赤  
70-80% 緑  
60-70% 水色  
0% 青